干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

# 2000—2018年锡林郭勒地区干旱时空变化及其气候响应

吴英杰， 全 强， 陈晓俊， 王文君， 周泉成， 尹 航， 李 玮
（水利部牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020）

**摘 要：**温度植被干旱指数（Temperature Vegetation Dryness Index，*TVDI*）是一种反映干旱状况的重要方法。以内蒙古自治区锡林郭勒为研究区，基于温度植被干旱指数，采用趋势分析、R/S分析方法，探究了锡林郭勒地区2000—2018年温度植被干旱指数*TVDI*时空变化特征及其降水、气温气候因子对*TVDI*变化的影响关系。研究表明：（1）19 a间，*TVDI*的偏差值呈现先减少后增大的趋势，19 a平均*TVDI*值为0.55，*TVDI*值范围为0.51～0.61，说明锡林郭勒地区整体处于轻旱状态。（2）19 a间，锡林郭勒地区*TVDI*呈明显增加的面积占9.48%、轻度增加的面积占18.52%，增加的趋势主要分布在东乌珠穆沁旗东北部地区；*TVDI*呈明显减少的面积占28.65%、轻度减少的面积占9.03%，减少趋势的主要体现苏尼特右旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗和镶黄旗地区。19 a来锡林郭勒地区变化趋势为：东部强于西部。Hurst指数的平均值为0.44，大于0.44的地区占总面积的47.7%，整体干旱持续性略弱于反持续性。（3）*TVDI*与年平均气温相关关系较弱，而与月平均气温又较强的相关性。

**关 键 词：**温度植被干旱指数；时空变化；锡林郭勒；Hurst指数
**文章编号：**

干旱指某一地区的土壤水分、作物水分不平衡而产生的气象灾害[1]。发生干旱的几率和降雨量是成正比的，但是干旱并不完全由降雨量决定，还与蒸发等因素有关，是干旱的根本原因，它具有波及范围广、延续时间长和造成灾害的特点。干旱是人类社会面临的最为严重的自然灾害之一，已经直接或间接地影响到人类的生存和生活质量，特别是对农牧业生产带来巨大的损失。

遥感技术具有客观、及时、覆盖面广、数据连续性强、能够将传统的测点方法扩展到整个地区的信息等优点[2]，通过对区域的遥感影像进行分析，可以快速获得旱情资料，弥补了气象站的不足，为大范围的区域干旱监测开辟了新途径。自1970年以来，基于植被指数、地表温度的归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，*NDVI*）[3]，植被状态指数（Vegetation Condition Index，*VCI*）[4]，距平植被指数（Anomaly Vegetation Index，*AVI*）[5]，和温度条件指数（Temperature Condition Index，*TCI*）[6]已经应用于评价植被状况和干旱。大多数研究指出，仅用单一的指数来监测干旱状况是不够的。植被供水指数（Vegetation Water Supply Index，*VSWI*）[7]和条件植被温度指数（Vegetation Temperature Condition Index，*VTCI*）[8]、温度植被干旱指数（*TVDI*）[9-11]考虑了温度与植被指数双重特征，可以有效的反映干旱特征。在众多遥感监测模型中，温度植被干旱指数精度高，简单易行，容易实现[12-14]，目前基于*TVDI*的干旱监测、评估研究，多采用单一时刻的遥感数据对某一次或某一时段的干旱进行监测，很少探讨历史干旱变化趋势特征，而经过归一化处理的*TVDI*能在不同年份和不同月份间进行对比，可用于分析区域干旱变化趋势[15-16]。杜波波等[17]利用温度植被干旱指数分析了2002—2016年锡林郭勒草原生长季干旱时空变化特征，认为*TVDI*可以很好地反映锡林郭勒生长季干旱时空变化特征，并未对其进行影响因

**收稿日期：**2019－12－24； **修订日期：**2020－04－01
**资助项目：**内蒙古自治区科技计划重点项目（201802123）；中国水利水电科学研究院科研专项（MK2016J08）；内蒙古自治区自然科学基金（2017BS0512）；国家自然科学基金（51579157，51779156）
**作者简介：**吴英杰（1982—），男，内蒙古呼伦贝尔市人，水利部牧区水利科学研究所，工程师，主要从事牧区干旱与减灾、生态水文学等方面研究. E-mail: wuyingjie1230@163.com

素分析。同时，前人研究中常采用的线性趋势分析方法、相关分析、集合经验模态分解等趋势分析方法分析了研究区的干旱变化趋势。在已有趋势分析干旱的基础上，本文尝试引入Hurst指数对干旱的未来变化趋势进行探索。该方法在植被覆盖分析领域被广泛发展和使用并取得良好的成果。

锡林郭勒地区草原类型复杂多样，自西向东依次为荒漠化草原、沙地草原、典型草原和草甸草原，是内蒙古草原的主要组成部分。以锡林郭勒地区为研究对象来探讨其干旱时空特征及对气候的响应具有重要的理论和现实意义。因此，本研究选取锡林郭勒地区2000—2018年MODIS遥感产品作为主要数据源，采用趋势线分析法、Hurst指数法来探索干旱的时空变化情况；在此基础上，结合同期的气象数据资料，探究锡林郭勒盟地区干旱的时空变化规律及与气温、降水响应关系。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部，地处115°13′~117°06′E，43°02~44°52′N之间，属于北部温带大陆性气候，主要气候特点是风大、干旱、寒冷。平均降雨量大约为300 mm，由东南向西北递减，降雨多集中在夏季的7、8、9三个月，年平均相对湿度在60%以下，蒸发量在1 500~2 700 mm之间。

### 1.2 数据源与处理

采用2000—2018年中分辨率成像光谱仪数据(h25v04，h26v04)MOD13A2植被指数16 d合成产品和MOD11A2陆地表面温度8 d合成产品。从(https://search.earthdata.nasa.gov/)下载，空间分辨率为1 km。

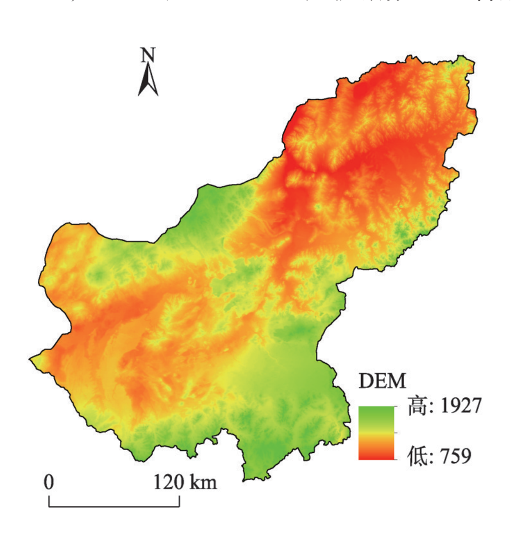



图1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical location in the study area

在对数据预处理时，首先利用MRT(MODIS Re-projectionTools)对两种产品数据进行格式转换、拼接、重投影等批处理，然后进行研究区裁剪与剔除异常值。其次，将两景MOD11 A2 8d产品数据应用最大值合成方法(Maximum synthesis method，MVC)得到与MOD13A2 16 d相对应的产品。MVC可以有效降低云、大气、太阳高度角的影响。最后，以0.01的*NDVI*值为区间，获得相同*NDVI*对应的最高和最低温度构建16 d的温度植被干旱指数产品。

气象数据本文选用中国气象局气象数据中心的中国地面气候资料月值数据集(http://data.cma.cn/)的气温和降水数据，探讨其对*TVDI*的影响。选取2000—2018年锡林郭勒境内苏尼特左旗、东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、多伦县、阿巴嘎旗和锡林浩特6个站点的气温和降水数据。

## 2 研究方法

### 2.1 植被指数—地表温度特征空间

Sandholt等[18]在*NDVI*和$T_s$的特征空间有一系列的土壤湿度等值线，两者之间的斜率与土壤水分呈负相关。用于间接表示土壤含水状况，因此提出了温度植被干旱指数的概念。*TVDI*由遥感图像提取的植被指数和地表温度计算得到，其定义为公式：

$$TVDI=(T_s-T_{s\min})/(T_{s\max}-T_{s\min}) \tag{1}$$

式中：$T_s$为任意像元地表温度；$T_{smax}$为干边上的地表温度，即为研究内具有某个*NDVI*值像元的最高地表温度。$T_{smin}$为湿边上的地表温度。即为研究区内具有某个*NDVI*值像元的最低地表温度。“干湿边”可以利用下式计算。

$$\begin{aligned} T_{s\max} &= NDVI\,a + b \\ T_{s\min} &= NDVI\,c + d \end{aligned} \tag{2}$$

式中：$a$、$b$、$c$、$d$是干、湿边通过线性拟合的模型参数。*TVDI*值越大，土壤湿度越低，表明土壤缺水越严重，干旱程度越高；反之干旱程度越低。

### 2.2 趋势分析

趋势分析可以模拟每个栅格单元的变化趋势，通过这种方法反映了在研究时间范围内，时间序列中*TVDI*的变化趋势，进而分析干旱的变化情况[19]。

$$Slope=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}k\times Y_k-\sum_{k=1}^{n}k\times\sum_{k=1}^{n}Y_k}{n\times\sum_{k=1}^{n}k^2-\left(\sum_{k=1}^{n}k\right)^2} \quad (3)$$

式中：变量$k$为1～$n$的年序号；$Y_k$表示第$k$年*TVDI*均值；$n$为样本数，*Slope*是2000—2018年*TVDI*的线性回归斜率，若*Slope*＞0，表明研究区呈干旱趋势，反之呈湿润趋势。

### 2.3 重标极差分析法

重标极差分析法（Rescaled Range Analysis，R/S）是一种定量描述一组数据随时间序列变化趋势的方法[20]。该方法的结果是Hurst指数，已成为定量描述样本数据时间序列信息长期依赖，计算方法如下：

设有时间序列{$TVDI(t)$}，$t=1,2,3,\cdots,n$，以及任意正整数$t\geq1$，定义均值序列：

$$\overline{TDVI_t}=\frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}TDVI_t \quad i=1,2,\cdots,n \quad (4)$$

计算累积离差：

$$X_{(i,t)}=\sum_{i=1}^{t}\left(TDVI_t-\overline{TDVI_t}\right) \quad 1\leqslant i\leqslant t \quad (5)$$

极差序列R(P)：

$$R_t=\max_{1\leqslant i\leqslant t}X_{(i,t)}-\min_{1\leqslant i\leqslant t}X_{(i,t)} \quad t=1,2,\cdots,n \quad (6)$$

标准差序列S(P)：

$$S_{(t)}=\left[\frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}\left(TDVI_i-\overline{TDVI_i}\right)^2\right]^{1/2} \quad t=1,2,\cdots,n \quad (7)$$

计算Hurst指数：

$$\frac{R_{(t)}}{S_{(t)}}=(ct)^H \quad (8)$$

式中：$H$即为Hurst指数，可以在双对数坐标系中用最小二乘法拟合求得。根据Hurst指数的大小来判断*TVDI*变化趋势是完全随机的还是存在规律性。Hurst取值范围为0～1，当$H=0.5$时，*TVDI*变化趋势是随机的，不存在长期相关性；当$0<H<0.5$时，说明*TVDI*未来的变化趋势与过去的相反，即反持续性；当$0.5<H<1$时，说明未来的*TVDI*变化趋势与过去的保持一致。

## 3 结果与分析

### 3.1 干旱时空变化特征

参阅众多研究干旱等级的划分[21]，以*TVDI*值作为不同干旱分级指标，将旱情划分为5级，分别为：湿润（0≤*TVDI*＜0.2）、正常（0.2≤*TVDI*＜0.4）、轻旱（0.4≤*TVDI*＜0.6）、干旱（0.6≤*TVDI*＜0.8）、重旱（0.8≤*TVDI*＜1）。

从锡林郭勒地区*TVDI*年际变化值可知（图2），锡林郭勒地区作为干旱半干旱地区主要牧草生产地，每年均有不同程度的干旱出现。

从干旱时间分布特征来看，采用偏差分析法分析锡林郭勒地区2000—2018年各年*TVDI*偏离多年平均水平的程度（图3a）。*TVDI*的偏差值呈现先减少后增大的趋势，19 a平均*TVDI*值为0.55，*TVDI*值范围为0.51～0.61，说明锡林郭勒地区整体处于轻旱状态，且*TVDI*值呈不规律波动变化趋势，峰值出现在（2010、2014），峰谷出现在（2002、2003、2005、2016、2017）。最大值出现在2010年，超过平均值0.06。最小值则在2003年，低于平均值0.04。19 a间上下波动起伏且幅度较大，整体表现为上升趋势，升速为15.6%。从干旱程度不同等级面积变化来看（图3b），轻旱所占比例最大（38%），干旱所占比例也达到（28%），占总体的面积的比例达到了64%以上，说明锡林郭勒地区近19 a间受牧业干旱影响范围较大，对牧业生产活动已经产生不利的影响。

从干旱空间分布特征来看，锡林郭勒地区*TVDI*值的分布有较明显的水平地带性规律，由东向西*TVDI*逐渐增大，与该地区植被类型的分布相对应。锡林郭勒地区*TVDI*值中等的地区主要为西部和中部偏西地区，正常、轻旱与干旱交替出现，所属草原类型为荒漠草原，苏尼特左旗、苏尼特右旗以及二连浩特市位于此处；*TVDI*高值主要在中部偏东地区，主要为典型草原；南部的太仆寺旗与多伦县属于农牧交错区，农业有灌溉用水补给，含水量较多，而且多伦县拥有丰富的水资源与森林资源，致使土壤含水量偏高。*TVDI*值低的地区主要分布在东乌珠穆沁旗的东北端呈湿润，隶属草甸草原。东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗以及锡林河流域上游*TVDI*值普遍低于其他地区。

从锡林郭勒地区*TVDI*年内变化值可知（图3c），研究区整体呈现干旱的状态，在1～4月的*TVDI*值都高于0.4，在3月份呈现出了最旱的状态，*TVDI*值达到了0.86，主要分布在锡林浩特与东乌珠穆沁旗部分区域。在4～6月*TVDI*值呈现减小的趋势，并在6月份达到了最小为0.47，在6～10月时间段内*TVDI*值有所起伏，主要在轻旱区间波动。在10～12月时间段内*TVDI*值呈现先增大后减小的趋势，并在

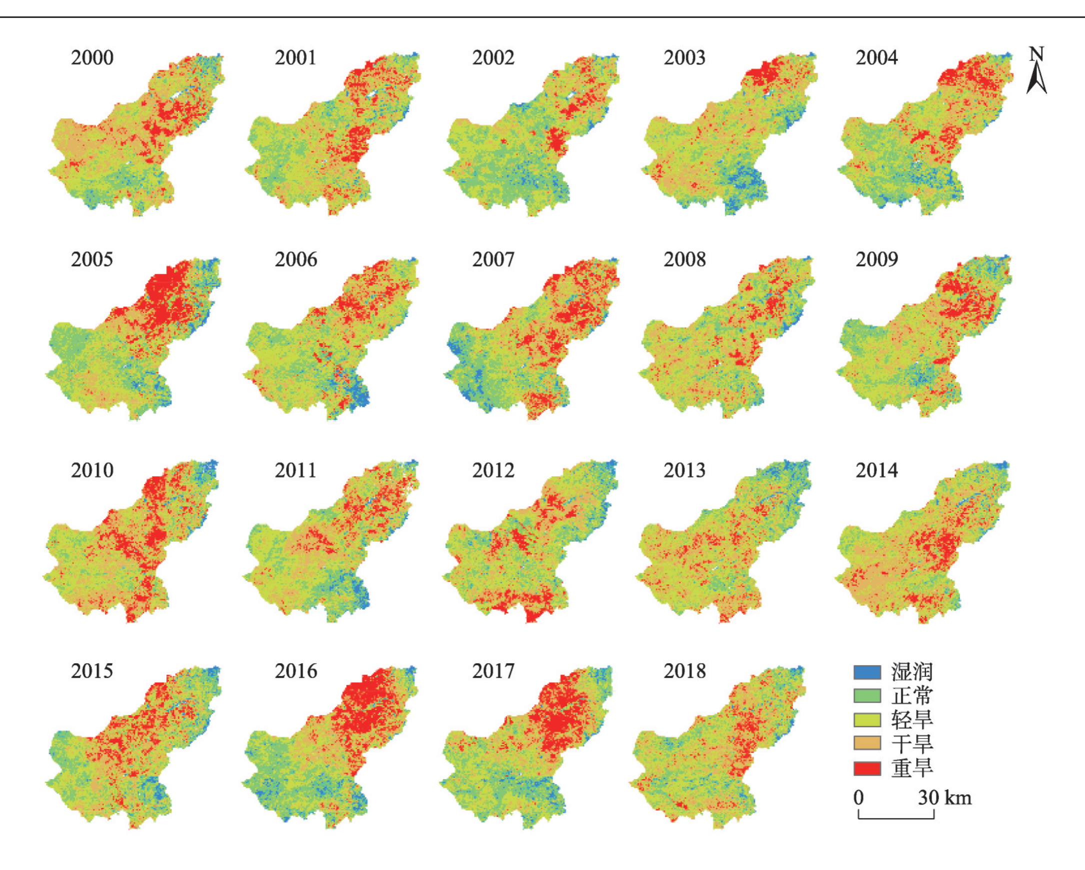



图2 2000—2018 *TVDI*年空间分布

Fig. 2 Year *TVDI* spatial distribution of 2000-2018

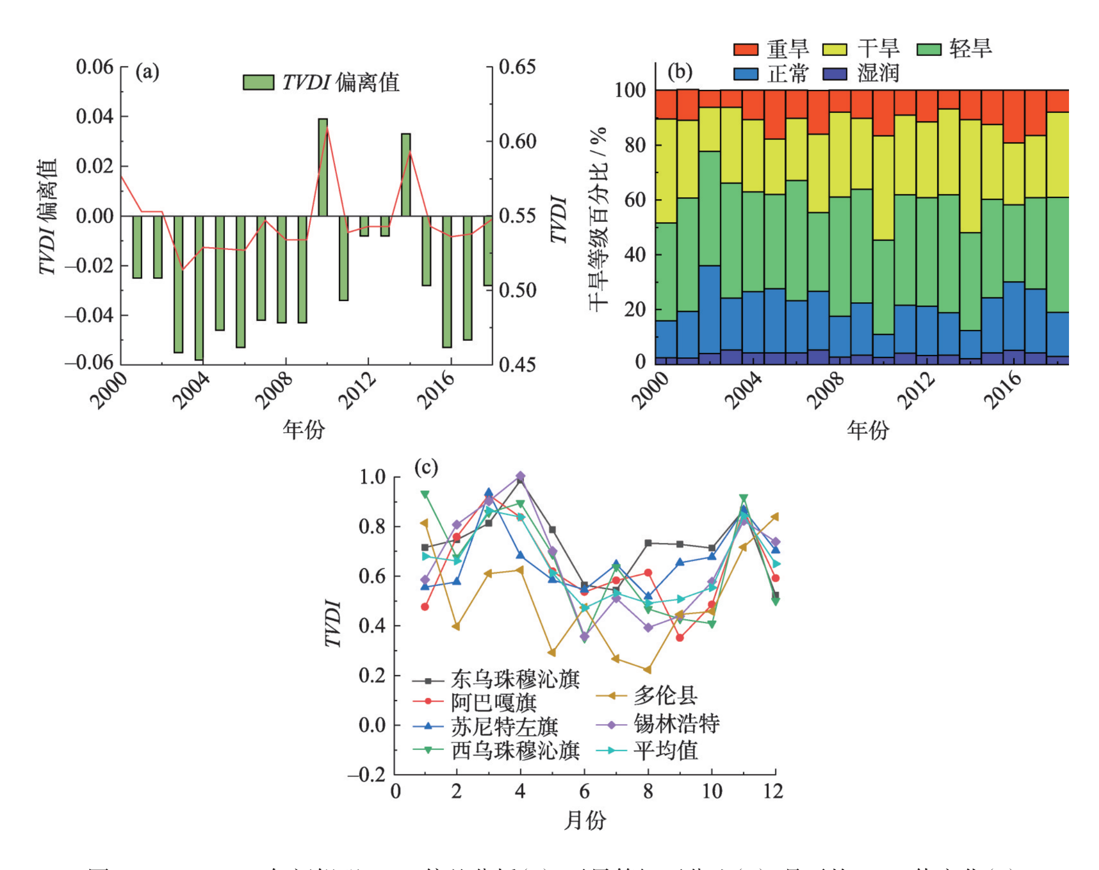



图3 2000—2018年间锡盟*TVDI*偏差分析(a)、干旱等级百分比(b)、月平均*TVDI*值变化(c)

Fig. 3 Deviation analysis of Ximeng *TVDI* between 2000 and 2018 (a), percentage of drought grade(b), Monthly mean *TVDI* value changes (b)

11月份达到了最大，为0.84，研究区整体属于重旱等级。

### 3.2 干旱变化趋势与预测

基于一元线性回归模型，在像元尺度上分析了锡林郭勒地区2000—2018年*TVDI*变化趋势，将其分为减小和增大二类：(*Slope* < 0和*Slope* > 0)，其中呈减小趋势和增大趋势面积分别为8 8932 km$^2$和113 647 km$^2$，各占43.9%，56.1%，整体上表现为干旱趋势。对回归趋势进行统计检验，根据变化趋势大小划分为5个等级[22]：明显减少(*Slope* ≤-0.015)、轻度减少(-0.015 < *Slope* ≤-0.005)、基本稳定 (-0.005 < *Slope* ≤0.005)、轻度增加(0.005 < *Slope* ≤ 0.015)、明显增加(*Slope* > 0.015)。由(图4a)可知，明显增加的面积占9.48%、轻度增加的面积占18.52%，增加的趋势主要分布在东乌珠穆沁旗东北部地区；*TVDI*呈明显减少的面积占28.65%、轻度减少的面积占9.03%，减少趋势的主要体现苏尼特右旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗和镶黄旗地区。总体而言，19 a来锡林郭勒地区变化趋势为：东部强于西部。

根据Hurst指数法，计算锡林郭勒地区逐个像元的Hurst指数(图4b)。Hurst指数的平均值为0.44，大于0.44的地区占总面积的47.7%，表明整体*TVDI*持续性略弱于反持续性。Hurst指数与*TVDI*指数密切相关，*TVDI*值大时*H*值高，*TVDI*值低时*H*值低。根据*TVDI*未来变化特征，得到锡林郭勒地区干旱未来变化特征。从空间分布上看，锡林郭勒地区的苏尼特左旗的Hurst指数较高，由于苏尼特草原是纯天然牧场，境内无长年河流，地表水贫乏，因此干旱变化的持续性较高；南部Hurst指数较低，主要零散分布在太仆寺旗与多伦县一带，由于该地区属于农牧交错区，农业有灌溉用水补给，含水量较多，因此干旱持续性较差。

将Hurst指数空间格局与Slope变化趋势图进行叠加，得出*TVDI*未来变化趋势分布图(图4c)，将研究区*TDVI*变化可持续性趋势分为反持续增大(即从增大到减小)、持续增大、无持续性、持续减小和反持续减小(即从减小到增大)5个等级[23]。其中反持续增大的地区占总面积的23.07%，反持续减小的地区占总面积45.51%，主要分布在苏尼特右旗、镶黄旗及正镶白旗一带；持续减小的地区占26.79%，主要分布在东乌珠穆沁旗东北边缘与锡林浩特；增大的地区仅占总面积的3.36%，主要分布在多伦县、太仆寺旗及正蓝旗宁夏西北部地区；无持续的面积仅占1.27%，主要分布在东乌珠穆沁旗。

### 3.3 气温与降水对*TVDI*的影响

为了探究气象因子与*TVDI*变化的关系，本文分析了主要气象因子气温和降水的年际变化及其与*TVDI*的相关关系。计算研究区6个气象站点的年平均气温及年降水量，并取各站点平均值来代表锡林郭勒地区19 a的整体气温和降水情况。由图5可知，锡林郭勒地区年降水量在170 ~ 320 mm之间波动，呈现增加的趋势，而19 a的温度在2 ~ 12 ℃之间波动，呈现明显增加的变化趋势，回归方程均通过0.05水平的显著性检验，说明19 a来锡林郭勒地区降水量与气温均在显著增加。

通过提取以气象站点为中心、5 km为半径的缓冲区，计算缓冲区*TVDI*均值作为某站点对应的*TV-*

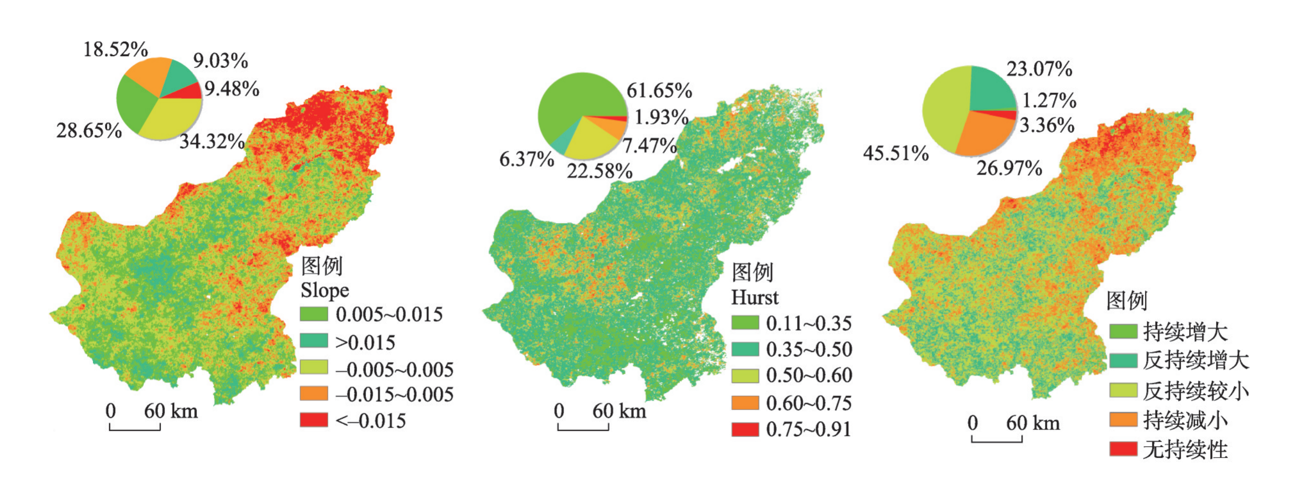



图4 2000—2018年间锡盟*TVDI*变化趋势(a)、*TVDI* Hurst指数(b)及锡盟*TVDI*未来变化趋势(c)

Fig. 4 Change trend of *TVDI*(a), *TVDI* Hurst index(b) and future change trend of ximeng *TVDI* (c) between 2000-2018

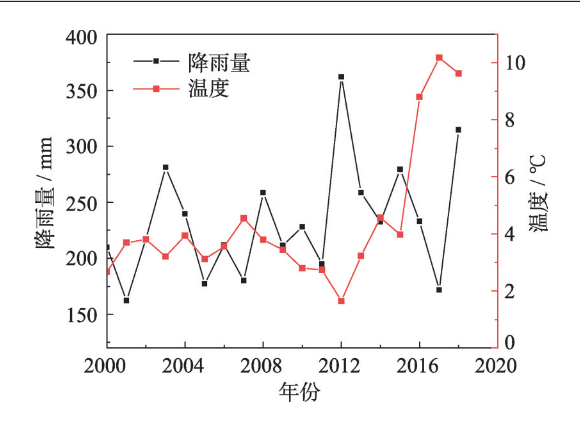



图5 2000—2018年锡林郭勒年降水量与年平均气温变化趋势

Fig. 5 Change trend of annual precipitation and annual average temperature in Xilingol from 2000 to 2018

*DI*值,分别建立气象因子与*TVDI*的关系,结果见图6。结果显示锡林郭勒地区*TVDI*值与年平均降水量与月平均降雨量都呈现负相关关系,决定系数分别为0.43;0.50,相关程度较高,通过$P<0.05$显著性检验。而*TVDI*与年平均气温关系较弱,但是*TVDI*与月平均气温都较强的相关性,决定系数为0.33。总之,气象因子中的年平均降水量与月平均气温是影响锡林郭勒地区2000—2018年*TVDI*值减小的主要因素。在相关研究中,杨玲等[24]认为降水与*TVDI*呈反"S"关系,温国涛等[25]认为降水与*TVDI*呈负相关,二者就气温与*TVDI*关系未达成一致,傅新等[26]认为气温与*TVDI*呈正相关,李彩瑛等[27]认为气温与*TVDI*无相关性,本研究主要认为降雨与气温与*TVDI*都有相关性,体现在月降雨量与月平均气温,出现这些差异可能与研究区及研究时段有关。

## 4 讨 论

本文认为*TVDI*指数可以较好的表征研究区干旱情况,并采用趋势分析、*R/S*分析方法分析了2000—2018年锡林郭勒地区干旱变化趋势。陈斌[28]也证明了温度植被干旱指数对锡林郭勒草原土壤干湿状况的反演具有较高的适用性,与本文对该时间段内的旱区分布范围、旱情强度等级、干旱发展进程等方面基本相似,2010年的干旱主要集中在东部地区,西部地区干旱等级较小。本文在前人

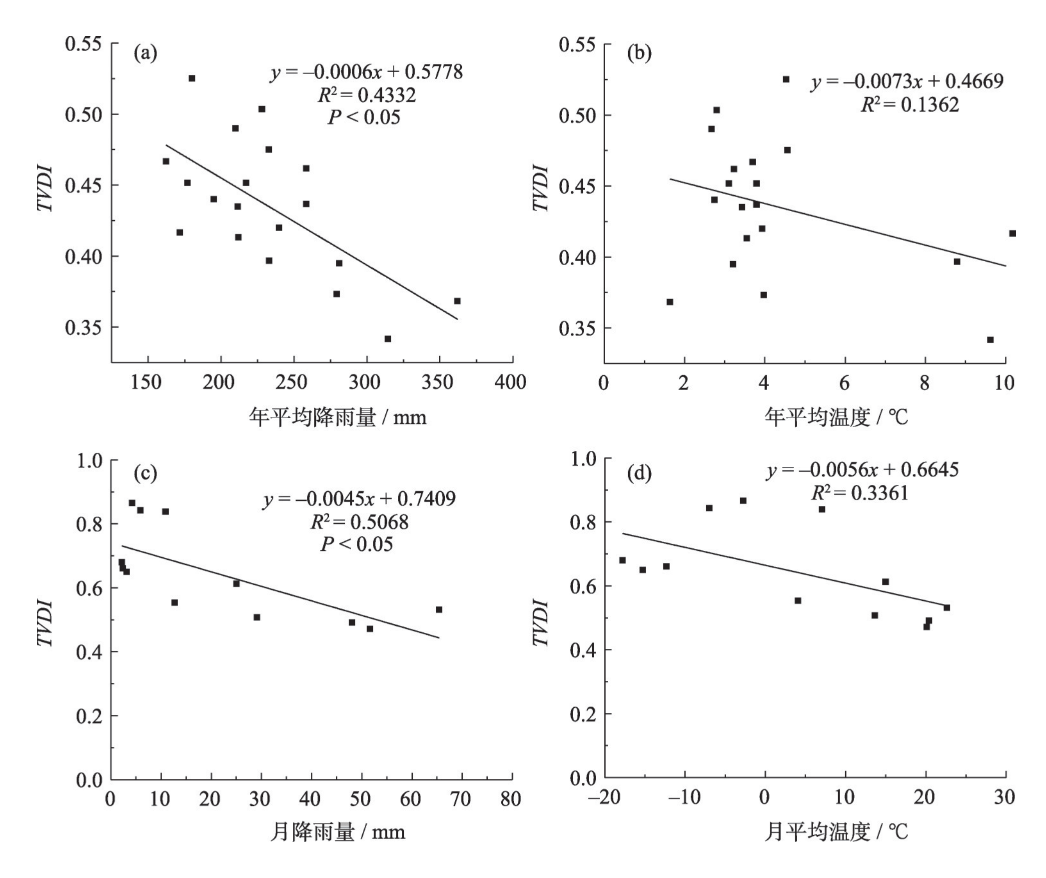



图6 *TVDI*与年平均降水量关系(a)、*TVDI*与年平均气温关系(b)、*TVDI*与与月平均降水量关系(c)、*TVDI*与月平均气温关系(d)

Fig. 6 Relationship between *TVDI* and annual mean precipitation (a), *TVDI* and annual mean temperature(b), *TVDI* and monthly mean precipitation(c), and *TVDI* and monthly mean temperature(d)

的时序性分析研究成果上[29]，引入Hurst指数对连续序列的温度植被干旱指数进行分析能够更加精准的探索干旱的变化趋势，并且在土壤水分减少的情况下植被生长可能面临严重压力。同时本文仅从从气象因子如降水、气温等方面考虑，而没有同时考虑地形、植被、地表覆盖等下垫面因素对其干旱分布的影响，这些都会对土壤干湿状况产生影响，从而使*TVDI*结果可能会发生偏差。因此在后续的研究中应该考虑这些问题，提高干旱监测的能力。

## 5 结 论

（1）19 a间，*TVDI*的偏差值呈现先减少后增大的趋势，19 a平均*TVDI*值为0.55，*TVDI*值范围为0.51 ~ 0.61，说明锡林郭勒地区整体处于轻旱状态，最大值出现在2010年，超过平均值0.06。最小值则在2003年，低于平均值0.04，整体表现为上升趋势，升速为15.6%。从干旱程度不同等级面积变化来看，发生旱情的面积占总体的比例达到了66%以上，其中轻旱在研究区分布面积最明显达到了38%。

（2）19 a间，锡林郭勒地区*TVDI*呈明显增加的面积占9.48%、轻度增加的面积占18.52%，增加的趋势主要分布在东乌珠穆沁旗东北部地区；*TVDI*呈明显减少的面积占28.65%、轻度减少的面积占9.03%，减少趋势的主要体现苏尼特右旗、苏尼特左旗、阿巴嘎旗和镶黄旗地区。锡林郭勒地区变化趋势为：东部强于西部。在未来变化趋势上，其中反持续增大的地区占总面积的23.07%，反持续减小的地区占总面积45.51%，主要分布在苏尼特右旗、镶黄旗及正镶白旗一带。

（3）19 a间，锡林郭勒草原年降水量与年平均气温在变化趋势中出现了显著的增加。*TVDI*值与年平均降水量与月平均降雨都呈现负相关关系，决定系数分别为0.43；0.50，通过0.05水平的显著性检验，而*TVDI*与年平均气温相关性较弱，但与月平均气温有较强的相关性。

### 参考文献(References)


[1] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60−65. [WANG Jinsong, GUO Jiangyong, ZHOU Yuewu, et al. Pogress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 60−65. ]

[2] 齐述华, 李贵才, 王长耀, 等. 利用MODIS数据产品进行全国干旱监测的研究[J]. 水科学进展, 2005, (1): 56−61. [QI Suhua, LI Guicai, WANG Changyao, et al. Study on monitoring drought in China with MODIS product[J]. Advances in Water Science, 2005, (1): 56−61. ]

[3] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于EOS/MODIS数据的NDVI与EVI比较研究[J]. 地理科学进展, 2007, (1): 26−32. [LI Hongjun, ZHEN Li, LEI Yuping, et al. Comparison of NDVI and EVI based on EOS/MODIS data[J]. Progress in Geography, 2007, (1): 26−32. ]

[4] KOGAN F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405−1419.

[5] 江东, 付晶莹, 庄大方, 等. 2008−2009年中国北方干旱遥感动态监测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 92−101. [JIANG Dong, FU Jingying, ZHUANG Dafang, et al. Dynamic drought- remote sensing monitoring in north China from 2008 to 2009[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 92−101. ]

[6] 牟伶俐, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 基于植被与温度条件的农业旱情遥感监测研究[J]. 世界科技研究与发展, 2006, (3): 26−31. [MU Linli, WU Bingfang, YAN Nana, et al. Agricultural drought monitoring with vegetation condition and temperature condition[J]. World Sci-Tech R & D, 2006, (3): 26−31. ]

[7] 张洁, 武建军, 周磊, 等. 基于MODIS数据的农业干旱监测方法对比分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 48−54. [ZHANG Jie, WU Jianjun, ZHOU Lei, et al. Comparative study on remotely sensed methods of monitoring agricultural drought based on MODIS data [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(5): 48−54. ]

[8] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, (2): 22−26. [SUN Wei, WANG Penxin, HAN Lijuan, et al. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, (2): 22−26. ]

[9] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(*TVDI*)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, (6): 473−478. [YAO Chunsheng, ZHANG Zengxiang, WANG Xiao, et al. Evaluating soil moisture status in xinJiang using the temperature vegetation dryness index (*TVDI*) [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, (6): 473−478. ]

[10] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度−植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1205−1216. [YANG Xi, WU Jianjun, Yan Feng, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/ vegetation index space[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (3): 1205−1216. ]

[11] 王思楠, 李瑞平, 韩刚, 等. 基于遥感数据对毛乌素沙地腹部旱情等级的景观变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 1080−1087. [WANG Sinan, LI Ruiping, HAN Gang, et al. Charac-

teristics of the landscape changes under the hinterland drought conditions in Mu Us Sandland[J]. Arid Land Geography, 2018, 41 (5): 1080-1087. ]

[12] PRICE J. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation[J]. Water Retour, 1980, 16(4): 787-795.

[13] NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation oil regional surface resistance to evapotranspiration Iron NDVI and Thermal IR AVHRR data[J]. Journal of Applied Meteorology, 1989 28: 276-284.

[14] 王思楠, 李瑞平, 韩刚, 等. 基于多源遥感数据的TVDI方法在荒漠草原旱情监测的应用[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(3): 458-464. [WANG Sinan, LI Ruiping, HAN Gang, et al. Application of the multi-source remote sensing data-based TVDI method in monitoring desert grassland drought[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(3): 458-464. ]

[15] 王婷婷, 张洪岩, 郭笑怡, 等. 基于温度植被干旱指数的松辽平原干旱时空特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(3): 383-389. [WANG Tingting, ZHANG Hongyan, GUO Xiaoyi, et al. Spatiotemporal change of drought over the Songliao Plain based on TVDI[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(3): 383-389. ]

[16] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 等. 2000—2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J] . 干旱区地理, 2019, 42 (4): 1124-1132. [ZHANG Siqi, CHEN Hui, SONG Minghua, et al. Spatial and temporal variation of fractional vegetation cover and its relationship with environmental factors in the Qaidam Basin during 2000—2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 902-913. ]

[17] 杜波波, 阿拉腾图娅, 包刚. 2002-2016年锡林郭勒草原干旱时空特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 190-202. [DU Bobo, Alatengtuya, BAO Gang. Temporal and Spatial Characteristics of Drought in the Xilingol Grassland From 2002 to 2016[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 190-202. ]

[18] SANDHOLT I, RASMUSSEN K. ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 213- 224.

[19] 马磊, 闫浩文, 何毅, 等. 2001-2015年喜马拉雅南麓地区植被变化遥感监测[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 405-414. [MA Lei, YAN Haowen, HE Yi, et al. Vegetation changes in south Himalayas areas based on remote sensing monitoring during 2001-2015 [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 405-414. ]

[20] 佟斯琴, 张继权, 包玉海, 等. 基于Hurst指数的1982-2013年蒙古高原植被动态变化趋势及其影响因素分析[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 595- 610. [TONG Siqin, ZHANG Jiquan, BAO Yuhai, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982- 2013[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5): 595-610. ]

[21] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, (5): 420- 427 + 436. [QI Suhua, WANG Jinsong, NIU Zheng. Evaluating soil moisture status in china using the temperature/vegetation dryness index (*TVDI*) [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, (5): 420-427. ]

[22] 吴欣睿, 那晓东, 臧淑英. 温度植被干旱指数在2000—2015年松嫩平原土壤湿度中的应用研究[J]. 生态学报, 2019, (12): 1-9. [WU Xinrui, NA Xiaodong, ZANG Shuying. Application of temperature vegetation dryness index in the estimation of soil moisture the Songnen Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, (12): 1-9. ]

[23] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2128- 2138. [ZHANG Chong, LEI Tianwang, SONG Tianxing, et al. Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2128-2138. ]

[24] 杨玲, 杨艳昭. 基于TVDI的西辽河流域土壤湿度时空格局及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(2): 76-81. [YANG Lin, YANG Yanzhao. The spatial and temporal pattern of soil moisture in the west Liaohe River basin based on TVDI method and its influencing factors[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(2): 76-81. ]

[25] 温国涛, 白建军, 孙嵩松. 基于时间序列遥感数据的陕西省2004—2014年干旱变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 221- 229. [WEN Guotao, BAI Jianjun, SUN Songsong. Variation of drought in Shaanxi from 2004 to 2014 based on remotely sensed data[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(1): 221-229. ]

[26] 傅新, 宋春桥, 钟新科. 藏北高原土壤湿度时空变化分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 464- 474. [FU Xin, SONG Chunqiao, ZHONG Xinke. On spatial and temporal variation of land surface moisture in northern Tibetan[J]. Advances in Water Scienc, 2012, 23(4): 464-474. ]

[27] 李彩瑛, 阎建忠, 刘林山, 等. 基于TVDI的羌塘高原夏季土壤湿度变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2101-2111. [LI Caiying, YAN Jianzhong, LIU Lingshan, et al. Analysis of soil moisture variation in summer of Qiangtang Plateau based on TVDI[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2101-2111. ]

[28] 陈斌, 张学霞, 华开, 等. 温度植被干旱指数(*TVDI*)在草原干旱监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 930-937. [CHEN Bin, ZHANG Xuexia, HUA Kai, et al. Application study of temperature vegetation drought index (*TVDI*) in grassland drought monitoring[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 930-937. ]

[29] 陈丙寅, 杨辽, 陈曦, 等. 基于改进型TVDI在干旱区旱情监测中的应用研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 902-913. [CHEN Bingyin, YANG Liao, CHEN Xi, et al. Application of modified TVDI in drought monitoring in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 902-913. ]

# Temporal and spatial variations of drought and climatic response in the Xilingol grassland from 2000 to 2018

WU Yingjie, QUAN Qiang, CHEN Xiaojun, WANG Wenjun, ZHOU Quancheng, YIN Hang, LI Wei

(*Institute of Water Resources Science in Pastoral Areas of Ministry of Water Resources, Hohhot* 010020, *Inner Mongolia, China*)

**Abstract:** The relationship between drought and meteorological factors is an important component in the study of arid ecosystems. Based on MODIS-*TVDI* data, this paper analyzed the spatiotemporal changes of drought in the Xilinguole grassland from 2000 to 2018 by combining RS and meteorological data to explore the correlation between drought and rainfall and temperature. The results show that over the 19 study period, the deviation of *TVDI* in the Xilinguole area first decreased and then increased, with an average *TVDI* value of 0.55 and a *TVDI* value range of 0.51-0.61. This indicates that the Xilinguole area was in a state of light drought during that period. The areas of *TVDI* increase and decrease from 2000 to 2018 were 88,932 $km^2$ and 113,647 $km^2$, respectively, with each accounting for 43.9% and 56.1% of the total area. The average value of the Hurst index is 0.44 and the area greater than 0.44 accounts for 47.7% of the total area. The overall drought persistence is slightly weaker than the anti-persistence, and drought increased significantly in some areas, most of which were distributed in Taipusi Banner and Duolun County, from 2000 to 2018. In addition, the most obvious interannual changes occurred in 2010 and 2014 and the drought trend was particularly obvious in the typical steppe, desert steppe, and farming-pastoral ecotone lands. Additionally, the relationship between different meteorological elements and drought is different. *TVDI* is positively related to precipitation and temperature and *TVDI* is not significantly related to annual average temperature.

**Key words:** Temperature vegetation drought index; Drought; Time and space change; Hurst index